



Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués

Yves-Marie Cabidoche, Philippe Cattan, Marc Dorel, Jean-Marie Paillat

► To cite this version:

Yves-Marie Cabidoche, Philippe Cattan, Marc Dorel, Jean-Marie Paillat. Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, 2002, Montpellier, France. 16 p. cirad-00180727

HAL Id: cirad-00180727

<http://hal.cirad.fr/cirad-00180727>

Submitted on 19 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Serge Marlet et Pierre Ruelle (éditeurs scientifiques), 2002. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France. CEMAGREF, CIRAD, IRD, Cédérom du CIRAD.

Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués

Yves-Marie CABIDOCHÉ*, Philippe CATTAN**, Marc DOREL**, Jean-Marie PAILLAT***

* INRA, Département environnement et agronomie, Centre Antilles-Guyane, Unité agropédoclimatique, F 97170 Petit-Bourg. cabidoch@antilles.inra.fr

** CIRAD-FLHOR, Guadeloupe, Neufchâteau, Sainte-Marie, F 97130 Capesterre-Belle-Eau. philippe.cattan@cirad.fr, marc.dorel@cirad.fr

*** CIRAD-TERA, La Réunion, *adresse actuelle* : UMR Sol, agronomie, spatialisation, ENSAR-INRA, 65 rue de Saint-Brieuc, F 35042 Rennes Cedex. paillat@roazhon.inra.fr

Résumé

Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués

Dans les départements français tropicaux insulaires (Guadeloupe, Martinique, Réunion), les roches volcaniques sont entièrement altérables. L'âge et le bilan hydrique déterminent la nature des sols argileux. Dans les zones humides à sols ferrallitiques à halloysite, ou andosols à allophane, l'impact des fertilisations azotées excessives sur les teneurs en nitrates des eaux est faible, pour deux raisons probables : (i) dilution par des flux importants ; (ii) capacité d'échange anionique des andosols. Les seules alertes concernent des cultures intensives, sur des sols jeunes peu propices à l'adsorption des nitrates.

Les périmètres irrigués ont permis le développement de cultures intensives, fortement fertilisées sur les vertisols à smectite en zones sèches. Leur irrigation excessive provoque un gonflement et un stress hydrique d'anoxie des cultures, qui entretient une augmentation des fréquences d'arrosage. L'excès d'irrigation peut alors entraîner des solutés en forte concentration. La mosaïque de cultures irriguées et pluviales peu fertilisées expliquerait un impact pourtant modéré sur les nappes.

Plusieurs questions de recherche concernent les formes d'azote exportées (nitrates, ammonium, ...), les voies d'exportation (drainage, ruissellement, volatilisation) selon les milieux, la dynamique des ressources en eau souterraines, et les responsabilités respectives de l'agriculture et de l'habitat qui se côtoient.

Des pratiques sont préconisées dans les périmètres irrigués, les plus susceptibles d'exporter des nitrates :

- fertilisation raisonnée,
- pilotage de l'irrigation (THERESA pour les vertisols, tensiomètres pour les sols rigides),
- rotations de cultures pluviales et irriguées, pour entretenir la réserve en eau des sols et disperser les « fuites » de nitrates.

Summary

Agriculture intensification and nitrogen pollution hazard of the water resources in the french insular overseas departments: watch over agricultural practices in the irrigated perimeters.

In the french insular overseas departments (Guadeloupe, Martinique, Réunion), the volcanic rocks are quickly and entirely weathered. Both soil age and hydric balance determine the nature of the clayey soils. In the high rainfall areas with halloysitic ferralsols or allophanic andisols, the impact of excessive nitrogen fertilisation on the nitrate concentration of water is low, for two possible reasons: (i) dilution by high waterflows and (ii) anion exchange capacity of andisols. The only warnings concern intensive crops on young sandy soils which do not adsorb nitrates.

Irrigation perimeters allowed the development of intensive and highly fertilised crops on the smectitic vertisols of the driest areas. The excessive irrigation result in a soil swelling and plant anoxic stress which tend to increase the irrigation frequency. Excess of irrigation can then leach high concentration solutes. The patching of irrigated and low input pluvial crops could explain a moderate impact on the water tables.

Several research topics remain, concerning nitrogen output forms (nitrates, ammonium...), output ways (drainage, runoff, volatilisation), underground water resource dynamics and responsibilities of both agriculture and habitat, which are imbricated, on nitrate content increase.

Introduction

Les Départements français d'outre-mer insulaires (DOM : Guadeloupe, Martinique, Réunion) sont des territoires exigus (quelques dizaines de kilomètres de diamètre ou longueur) et peuplés, dans lesquels l'espace urbanisé infiltre l'espace agricole. Soumis à la réglementation française et européenne, leurs ressources en eau captées et distribuées dans les adductions d'eau potable sont suivis par les services sanitaires nationaux. A la fin du siècle dernier, la Commission européenne s'est préoccupé de savoir quelles mesures, préventives ou éventuellement curatives en termes de bonnes pratiques agricoles, ces Départements mettaient en œuvre dans le cadre de la Directive européenne « Nitrates », destinée à maintenir la qualité des eaux face aux risques de pollution par l'azote nitrique. Une expertise a été demandée à l'INRA et au CIRAD en 1998 par le ministère français de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, afin de faire un état des lieux de la pollution des ressources en eau par l'azote agricole, et définir les recherches ainsi que les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour gérer ce risque. La présente communication reprend l'essentiel des éléments originaux de l'expertise, en s'attachant à montrer pourquoi les périmètres irrigués requièrent une vigilance particulière face au risque de pollution par l'azote agricole.

Le cadre général

Des pratiques agricoles souvent intensives, notamment en matière de fertilisation azotée, sur des sols très variés dans leur nature minéralogique et leurs propriétés physico-chimiques.

Pour des raisons diverses mais complémentaires, l'agriculture des DOM insulaires a suivi une forte intensification dans la deuxième moitié du 20^e siècle (Ministère de l'Agriculture et de la pêche, 1999) :

- Des cultures d'exportation, bénéficiant d'une valeur ajoutée notable, voire forte, se sont développées grâce à des cours soutenus (banane aux Antilles) ou la satisfaction de marchés de contre-saison (melon aux Antilles).
- La sur-rémunération des salariés des services a été calquée sur celle des fonctionnaires. Malgré un taux de chômage élevé, les mesures d'assistance aux demandeurs d'emploi leur confèrent un certain pouvoir d'achat. Les marchés locaux présentent donc un fort potentiel de valeur ajoutée, que ce soit en légumes ou en viande, autorisant les cultures maraîchères ou vivrières ou l'élevage intensif (porc, vaches laitières en particulier à la Réunion) malgré des coûts de production élevés.
- Le développement de périmètres irrigués, fortement subventionné jusqu'à la parcelle, a encouragé cette intensification en éliminant le facteur de risque pluviométrique.

La seule culture ayant présenté une trajectoire d'intensification plus modeste ou raisonnée est celle de la canne à sucre. Présente dans les trois départements, la canne fait l'objet d'une fertilisation azotée souvent limitante (Courtaillac, 1998), comme en témoignent les rendements moyens assez éloignés du potentiel, même en année climatique non limitante (Cruz et Guillaume, 1999). Elle n'est généralement pas suspecte de fuites de nitrates vers les ressources en eau (Ng Kee Kwong et Deville, 1984 ; Ng Kee Kwong et al., 1986))

Pour les autres cultures, la fertilisation excède souvent les besoins soit par manque de maîtrise technique dans le cas des cultures maraîchères où il n'est pas rare de noter des apports de plusieurs centaines de kgN/ha, soit parce que l'on tient compte des pertes éventuelles par lessivage (Godefroy et al., 1970, Godefroy et Dormoy, 1988 et 1989): dans les cultures bananières les préconisations (SICA-ASSOBAG, 1987) sont de 400 kgN/ha pour un objectif de récolte de 40 t/ha, alors que seulement moins de 80 kgN/ha seront exportés, et moins de 200 immobilisés par la plante entière, et restitués au sol à partir de la première récolte.

Cette intense fertilisation est traduite par les statistiques des douanes qui surveillent l'importation des engrais (tableau I) : les quantités d'azote importées sont supérieures à 100 kgN par hectare de surface agricole utile fertilisée.

Tableau I. Apport moyen d'azote par hectare de surface agricole utile

(source : Douanes françaises)

Engrais importés :	Guadeloupe	Martinique	Réunion
kg N /ha SAU fertilisée /an	118	180	136

La fertilisation azotée par les engrais dans les DOM insulaires est donc excédentaire par rapport aux besoins des organes récoltés dans beaucoup de cultures bananières ou maraîchères.

La Réunion présente une problématique spécifique : l'élevage laitier sur prairies artificielles dans les zones tempérées par l'altitude est pratiqué avec un chargement de parfois plus de 5 UGB/ha. Cet élevage est souvent complémenté en azote, ce qui engendre une production considérable de lisier confrontée à de faibles surfaces d'épandage sur les prairies. Dans certaines localités, l'élevage hors-sol (porcs, volailles) s'est fortement développé avec souvent peu de surfaces épandables à proximité.

Ces épandages d'azote, que ce soit sous forme d'engrais minéral ou d'effluents d'élevages, sont réalisés sur des sols tropicaux très variés sur de courtes distances.

Ces sols ont tous une roche mère d'origine volcanique, généralement des cendres très divisées, avec deux conséquences : tous les minéraux des roches sont altérables et, après quelques milliers d'année d'altération, les sols sont riches en « argiles » (constituants minéraux secondaires fins).

La nature de l'argile dépend du bilan hydrique et de l'âge des sols : smectite dans les zones à saison sèche marquée, halloysite puis allophane sur les formations jeunes, où la pluviométrie s'accroît, ou halloysite et oxyhydroxydes de fer sur les formations plus anciennes des zones humides (figure 1).

Les sols correspondants, vertisols, sols bruns, andosols, sols ferrallitiques, sont variés sur de courtes distances, et grossièrement d'autant plus acides que la pluviométrie est élevée (Colmet-Daage, 1976, 1979 ; Raunet M., 1988)

Les propriétés physico-chimiques et physiques des sols sont en conséquences très variées sur de courtes distances (figure 2), notamment :

- L'infiltrabilité à saturation est très faible sur les sols à argiles gonflantes (< 1 mm/jour). Il s'ensuit une faible capacité de drainage et au contraire une forte susceptibilité de

ruissellement. C'est le contraire pour les sols des régions les plus arrosées : une infiltrabilité de plusieurs dizaines de millimètres par heure dans les sols ferrallitiques et andosols limite le ruissellement aux quelques pluies les plus intenses et durables, et autorise des volumes drainés considérables, de plusieurs mètres cubes d'eau par mètre carré et par an.

- Les pH, neutres dans les zones les plus sèches favorisent la dispersion des smectites, et ceci d'autant plus que leur garniture est magnésienne et sodique, conformément à la prédominance des feldspaths sodiques et de ferro-magnésiens (amphibole, pyroxènes) dans la roche mère. Seules les argiles des horizons de surface sous forêt ou de l'ensemble du sol dans les contextes calcaires, ont une garniture calcique qui les stabilise. Au contraire, les sols des régions arrosées, acides, ont une agrégation très stable ; les plus petites particules transportables ont un diamètre centimétrique.

Il résulte de ces deux propriétés une distribution contre-intuitive du risque d'érosion hydrique superficielle, qui est maximal dans les zones les plus sèches et sur les sols profondément travaillés. L'érosion des sols humides requiert un transport d'agrégats, qui n'apparaît que lorsque des erreurs d'aménagement provoquent des ruissellements concentrés, et sur des sols auto-fragmentés par le retrait des halloysites et allophanes lorsqu'ils sont restés longtemps nus.

- La diversité des minéraux "argileux" se traduit par des propriétés d'échange et sorption ionique différentes. Les smectites à fort déficit de charge fixe ont une capacité d'échange uniquement cationique élevée. Les halloysites associées à des oxihydroxides métalliques ont une faible CEC, et pourraient développer une certaine capacité d'échange anionique (CEA). Quant aux allophanes, ils pourraient comporter une faible CEC associée à une CEA élevée lorsque leur pH demeure acide. Si ce dernier est élevé par chaulage, la CEC peut devenir importante. Selon ce schéma, les nitrates auront un comportement de soluté passif classique dans les sols des zones sèches, mais ils sont susceptibles d'une sorption plus ou moins importante dans les zones les plus pluvieuses.

Dans un tel contexte, il est possible que l'impact des excédents d'azote sur les différentes ressources en eau soit très variable selon les zones, et que cet excédent ne soit pas associé à un problème intensif en terme de concentration en nitrate des flux ruisselants ou drainants. Les régimes des rivières sont caractérisés par de nombreuses crues de chasse. Les régimes des nappes, développées dans des milieux fissurés ou tuilés sont quant à eux notoirement peu connus.

Notons enfin que la question de la suralimentation extensive de certains milieux en azote mérite d'être posée car, au-delà du risque de pollution des ressources en eau, elle peut avoir des conséquences sur la perturbation des écosystèmes côtiers, mangroves ou récifs coralliens.

L'état actuel de la pollution des ressources en eau

Pourquoi, malgré des quantités d'azote apportées aux cultures supérieures aux exportations (banane, maraîchage, élevage intensif) l'impact sur la concentration en nitrates des eaux distribuées est faible ?

Les seules alertes de plus de 40 mgNO₃⁻/l ont concerné une source à la Martinique située sous des cultures de banane et d'ananas de plusieurs centaines d'hectares, et un forage à la Réunion sous des cultures maraîchères de plusieurs dizaines d'hectares. Dans les deux cas, ces cultures étaient portées par des sols jeunes, peu acides, peu propices à l'adsorption, dans des zones recevant des pluviométries de 2 à 2,5 m/an, peu favorables à la dilution des nitrates.

Aucune concentration alarmante en nitrates n'a été relevée dans les rivières ou les sources alimentées par des zones bananières sur andosols recevant délibérément des apports azotés excédentaires.

Au-delà d'une importante réorganisation montrée par Chotte et al. (1994), deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer ce paradoxe :

- les nitrates seraient dilués par des lames d'eau ruisselées ou infiltrées importantes ;
- une capacité d'échange anionique des sols acides notamment des andosols, interviendrait pour réguler les fuites de nitrates.

Une simulation grossière a été appliquée en s'appuyant sur l'équation suivante :

$$[\text{NO}_3^-] \text{ des flux drainants} = \text{excédent } \text{NO}_3^- \text{ dans le sol} / \text{excès du bilan hydrique}$$

On suppose que tout l'excédent azoté est concrétisé sous forme de nitrates.

Dans un premier schéma (figure 3), appliqué aux sols sur cendres récentes (sols non ou peu évolués), nous avons maximisé le risque de fuite, en supposant que la sorption des nitrates est nulle.

Dans un deuxième schéma, consacré aux sols évolués (figure 4), nous avons inclus une CEA susceptible d'adsorber les nitrates, croissante avec la richesse en hydroxyles des minéraux, corrélée grossièrement avec la pluviométrie moyenne annuelle : nulle pour les vertisols, et représentant 60% de l'excédent pour les sols bruns andiques et 90% pour les andosols.

Dans les deux cas, le bilan hydrique a été établi avec une ETP distribuée linéairement en fonction de la pluviométrie, entre 1,8 m/an pour les zones les plus sèches, et 1,3 m/an pour les zones les plus humides. L'excédent de nitrate, a chaque apport, a été dilué dans la réserve facilement utilisable des sols, variant entre 1 m pour les andosols, et 0,5 m pour des vertisols subissant de nombreux labours. Il est ensuite déplacé par un flux drainant maximisé à l'excès du bilan (flux ruisselant supposé nul).

Pour les zones les plus sèches, comportant des périmètres irrigués sur vertisols, les bilans hydriques ont inclus différents niveaux de rationnement de l'irrigation des cultures.

Pourquoi, dans ce contexte, une vigilance particulière sur les périmètres irrigués ?

La proximité de « châteaux d'eau » constitués par les montagnes forestières a permis de mettre en place des périmètres irrigables avec une eau très pure, ne présentant aucun risque de salinisation ou sodisation des sols (Comité de Bassin de la Martinique, 1998 ; Comité de Bassin de la Réunion, 1999 ; Comité de Bassin de la Guadeloupe, 2000). La plupart de ces périmètres ont été développés dans les zones à saison sèche marquée, portant des sols argileux gonflants (vertisols, sols vertiques).

Dans ces sols, tout excès d'irrigation par rapport aux besoins des cultures provoque une fermeture des fonds de labour et induit une anoxie à la base de la couche travaillée (Cabidoche et Ney, 1987). L'absorption racinaire est perturbée, et la plante extériorise un stress hydrique analogue à un stress par manque d'eau. Comme la surface du sol sèche rapidement en surface, l'agriculteur a l'impression globale d'un manque d'eau et augmente la fréquence d'arrosage, ce qui devient de toute manière impératif vu la restriction du système racinaire (Ney, 1987).

La saison d'irrigation correspond donc généralement au maintien d'un bilan hydrique légèrement excédentaire, dont l'excès va drainer vers les nappes : les fonds de labour ne sont pas partout fermés et autorisent un drainage spatialement discontinu.

L'introduction de l'irrigation a permis le développement spectaculaire des cultures maraîchères, pour le marché local et l'exportation, mais aussi celui des cultures bananières, sur des sols indemnes des nématodes et charançons. Ces cultures sont pour l'instant l'objet d'un apport azoté excessif. Certaines cultures de melon, bénéficiant d'un encadrement technique compétent, reçoivent une fertilisation tenant compte des besoins exacts de l'objectif de rendement ; cependant, cette fertilisation ne prend pas en compte de manière rigoureuse la contribution des résidus du précédent cultural. Par ailleurs, la pratique de ferti-

irrigation pose problème si la saison sèche est coupée par des périodes pluvieuses : l'agriculteur est alors contraint de continuer les apports qui augmentent l'excès de bilan hydrique avec des concentrations minérales élevées.

Les périmètres irrigués sont donc des zones potentiellement polluantes en azote, car en l'état ils couplent un excédent d'apport azoté et une faible dilution par un bilan hydrique peu excédentaire.

La même simulation que précédemment a été appliquée à un excédent azoté de seulement 20 kgN/ha, et pour quatre mois de saison sèche (figure 5). L'irrigation n'a été prise en compte que pour les vertisols et les sols bruns. L'ETP et la pluviométrie sur quatre mois de saison sèche varient respectivement de (0,45 ; 0,185 m) pour les vertisols à (0,425 ; 0,397 m) pour les sols bruns et (0,29 ; 0,82 m) pour les andosols.

Bien que très schématique, cette approche exprime une distribution relative de risque où il apparaît que l'irrigation légèrement excessive peut être source de drainages fortement concentrés, même si l'excédent azoté est relativement modeste.

Quelques hypothèses pour expliquer une situation peu préoccupante de la qualité azotée des ressources en eau

En Guadeloupe, les teneurs relevées sur les rivières montrent de légers « flush » de nitrates que rien ne permet d'imputer à autre chose qu'au lessivage des horizons organiques des litières forestières. Quant à la nappe karstique de Grande-Terre, concernée par deux importants périmètres irrigables, on observe une augmentation de ses teneurs en nitrates, mais qui reste bien éloignée du seuil de 40 mg/l de la « Directive Nitrates » française.

Ceci semble contradictoire avec la simulation précédemment évoquée, mais deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette apparente contradiction :

- Les cultures irriguées de l'île sèche orientale (figure 6) sont pour l'instant principalement disséminées, à l'échelle de l'exploitation agricole, dans des cultures pluviales de graminées, peu ou non fertilisées (canne à sucre, prairies naturelles) (Benda et al., 1995)
- L'impact des aires monoculturales intensives irriguées se situe pour l'instant hors du réseau de suivi, qui ne concernait jusqu'à une époque récente que les eaux potabilisées distribuées. Le seul forage suivi à proximité d'un îlot de culture bananière irriguée de plusieurs dizaines d'hectare dans le nord de Grande-Terre montre du reste un accroissement significatif de teneur jusqu'à 16 mgNO₃⁻ / l.

Conclusion : des questions de recherche

On ne peut plus se contenter de raisonnements sur hypothèses tels qu'ils ont été développés au début de cette communication. Il est important d'acquérir des connaissances et de développer des modèles de simulation concernant différents phénomènes peu connus dans ces milieux tropicaux insulaires :

- **Les conditions des voies de minéralisation de l'azote** (NO₃⁻, NH₄⁺, NH₃, N₂), les **formes adsorbées ou exportées** (Sierra, 2000 ; Sierra et Marban, 2000), et **l'importance de la réorganisation**. Ces connaissances sont nécessaires pour mieux raisonner la fertilisation.
- **Les voies d'exportation** (drainage, ruissellement, volatilisation) selon les milieux et les systèmes de culture.

L'INRA et le CIRAD mènent aux Antilles et à la Réunion des recherches sur ces thèmes, qui incorporent le caractère polluant, non seulement des nitrates sur les eaux, mais aussi de l'ammonium sur l'atmosphère. On ne peut par ailleurs découpler ces recherches sur l'azote de celles concernant le stockage et la minéralisation du carbone dans les différents systèmes de culture ou d'élevage. Les premiers résultats incitent d'ores et déjà à reprendre les recherches sur la fertilisation des cultures, qu'elle soit minérale ou organique.

- **La dynamique des ressources en eau souterraines.** Les Directions régionales de l'environnement des trois DOM insulaires ont mis en route le suivi de la composition des eaux de nappes accessibles. Cependant l'interprétation et la prévision de ces compositions requièrent la mise en route de recherches en hydrologie des aquifères fissurés (karst) ou tuilés (coulées et projections volcaniques) dont le fonctionnement complexe est peu connu (BRGM).
- **Les parts de responsabilité de l'agriculture, de l'agro-industrie et de l'habitat** qui se côtoient (DIREN-Guadeloupe, 1999), surtout dans les zones sèches (figure 6) : leur impact est forcément conjoint sur la plupart des aquifères, mais aussi sur les écosystèmes côtiers proches et sensibles (mangroves, lagons). En particulier le rôle des effluents agro-industriels, mais surtout des stations d'épuration, dont beaucoup fonctionnent mal, et de toutes façons rejettent leurs effluents liquides en bord de mer, ne sont pour l'instant pas évalués. Il reste que les transferts naturels d'azote associés aux ouragans sont probablement non négligeables (Scatena et al., 1993 ; Silver et al., 1996)

De telles recherches sont forcément complexes et interdisciplinaires ; elles devront inclure les compétences des Universités et de l'IFREMER.

- **Des schémas de transferts territoriaux des ressources locales en matières organiques**, sous-produits agricoles, industriels ou urbains.

Le CIRAD et l'INRA ont engagé des programmes sur l'intérêt de ces transferts : à la Réunion remontée de bagasse pour composter les lisiers des élevages situés en altitude, puis descente de ce fumier pour fertiliser la canne (Aubry et al., 2001) ; à la Guadeloupe, épandage de boues d'épuration urbaine de qualité (Sierra et al., 2001) et de vinasses (Farinet, 2000).

Des pratiques à préconiser, en particulier dans les périmètres irrigués potentiellement les plus susceptibles d'exporter des nitrates.

Si les recherches mentionnées doivent apporter les conditions d'un encadrement du risque de pollution azotée, on peut sans attendre suggérer d'appliquer les « bonnes pratiques » agricoles suivantes :

- **Une fertilisation raisonnée** sur :
 - ✓ l'exportation par les organes récoltés,
 - ✓ la restitution de résidus de culture,
 - ✓ les reliquats d'azote minéral dans le sol si les lessivages réels d'azote sont éventuellement inférieurs à l'entraînement de l'azote en excès par l'excédent de bilan hydrique (andosols)
 - ✓ les données disponibles concernant l'efficacité réelle des engrais (Chotte et al., 1994)
- **Un pilotage de l'irrigation :**
Les bilans hydriques sont d'application délicate pour plusieurs raisons :
 - ✓ la pluviométrie et l'ETP ont une forte variabilité spatiale, respectivement à cause de la localisation des lignes de grains ou orages, et de la nébulosité.
 - ✓ Les coefficients culturaux ne sont pas forcément suffisamment connus
 - ✓ La pluie ou l'irrigation efficaces sont difficiles à évaluer, en particulier dans les sols vertiques susceptibles de ruissellement si les macro-fissures sont fermées, ou de drainage rapide si elles sont ouvertes jusqu'au substrat poreux (Bronswijk et al., 1995 ; Ruy, 1997).

Pour ces raisons, nous préconisons un **pilotage à partir de l'état des réserves du sol**

- ✓ **THERESA pour les vertisols ou les sols argileux déformables** : ce système utilise l'évaluation de la sollicitation de l'eau matricielle par la mesure du retrait vertical des couches de sol pour le déclenchement (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1996 ; Cabidoche et Dufour, 2000)
- ✓ **Tensiomètres pour les sols rigides** : la mesure de la succion a fait depuis longtemps ses preuves ; elle comporte l'avantage de permettre de montrer le sens des flux.
- **Des rotations de cultures pluviales et irriguées pour**
 - ✓ **entretenir la réserve en eau grâce à la porogenèse biologique** : des soles pluviales intercalaires sont nécessaires pour entretenir la porosité tubulaire stable d'origine biologique (racines, hyphes) qui contribue fortement au réservoir d'eau facilement disponibles ; au contraire, des sols irrigués et pétris par des travaux du sol fréquents voient ce compartiment régresser (Cabidoche et Guillaume, 1998, Cabidoche et al., 2000).
 - ✓ **dispenser les sources de fuites de nitrates** : la remarque faite ci-dessus doit correspondre à une stratégie territoriale d'assolement de cultures irriguées fortement fertilisées et pluviales faiblement fertilisées ; les fuites de nitrates seront au contraire maximales dans les grands îlots monocultureux intensifs irrigués. De toutes façons, pour des raisons de ressource, aucun des périmètres irrigués ne peut supporter une irrigation simultanée de sa surface.
- **Une simplification des travaux du sol** pour ne pas minéraliser inutilement du carbone et de l'azote (Blanchart et al., 2000 ; Cabidoche et al., 2000).

Bibliographie

- AUBRY C., PAILLAT J.-M., GUERRIN F., 2001.- Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage à La Réunion. Rapport CIRAD-Tera n° 16/01, CIRAD, Montpellier, 58p.
- BENDA C., RITZENTHALER D., ZEBUS M.-F., 1995. Étude des producteurs maraîchers du sud-est de la Grande-Terre (Guadeloupe). I - Bilan d'enquêtes exploratoires : La diversité des systèmes et des stratégies de production. *Note de Synthèse*, INRA Antilles-Guyane, ESR, (1):4.
- BLANCHART E., ACHOUAK W., ALBRECHT A., BARAKAT M., BELLIER G., CABIDOCHÉ Y.-M., HARTMANN C., HEULIN T., LARRE-LARROUY C., LAURENT J.-Y., MAHIEU M., THOMAS F., VILLEMIN G., WATTEAU F., 2000.- Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 309-328.
- BRONSWIJK J.J.B., HAMMINGA W., OOSTINDIE K., 1995. Rapid nutrient leaching to groundwater and surface water in clay soil areas. *Eur. J. Agron.*, 4, 431-439.
- CABIDOCHÉ Y.-M., NEY B., 1987.- Fonctionnement hydrique de sols à argiles gonflantes cultivés. II- Analyse expérimentale des fonctionnements hydriques associés à deux états structuraux en vertisol irrigué. *Agronomie*, 7, 4, 257-270.
- CABIDOCHÉ Y.-M., OZIER-LAFONTAINE H., 1995.- THERESA: I. Matric water content measurements through thickness variations in vertisols. *Agricultural Water Management*, 28: 133-147.
- CABIDOCHÉ Y.-M., GUILLAUME P. 1998.- A casting method for the three-dimensional analysis of the intra-prism structural pores in Vertisols. *European Journal of Soil Science*, 49, 187-196.
- CABIDOCHÉ Y.-M., DUFOUR L., 2000. Maîtrise de l'eau dans l'agriculture de la Guadeloupe. Rapport technique final, contrat de plan Etat –Région 1994-1999. APC INRA Antilles-Guyane, 24p.

- CABIDOCHÉ Y.-M., GUILLAUME P., HARTMANN C., RUY S., BLANCHART E., ALBRECHT A., MAHIEU M., ACHOUAK W., HEULIN T., VILLEMEN G., WATTEAU F., BELLIER G., 2000.- Déterminants biologiques du système poral de vertisols cultivés (Petites Antilles). Conséquences sur la disponibilité de l'eau des sols pour les plantes. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 329-352.
- CHOTTE J. L., FELLER C., VALLONY M.-J., NICOLARDOT B., 1994. Disponibilité de l'azote dans les sols cultivés des Petites Antilles. *Agriculture et développement*, 4, 23-30.
- COMITE DE BASSIN DE LA GUADELOUPE, 2000. Schéma Directeur d'Aménagement et de gestion des Eaux de la Guadeloupe (SDAGE). DIREN, Basse-Terre.
- COMITE DE BASSIN DE LA MARTINIQUE, 1998. L'eau en Martinique, état des lieux. DIREN, Fort-de-France.
- COMITE DE BASSIN DE LA REUNION, 1999. Schéma Directeur d'Aménagement et de gestion des Eaux de la Réunion (SDAGE). BRGM, Saint-Denis.
- COLMET-DAAGE F., 1976. *In* Atlas de la Martinique, CNRS, IGN, CEGET, Bordeaux.
- COLMET-DAAGE F., 1979. *In* Atlas de la Guadeloupe. CNRS, CEGET, Bordeaux
- COURTAILLAC N., 1998. Maîtrise du cycle de l'azote dans le système vertisol - canne à sucre. Conséquences sur la gestion des parcelles. Thèse de Doctorat, INP-ENSAIA, Nancy, 195p + annexes.
- CRUZ P., GUILLAUME P., 1999. Croissance et nutrition minérale de la canne à sucre au cours de repousses successives. *Cahiers Agricultures*, 8, 2, 101-107.
- DIREN-GUADELOUPE, 1999. Schéma de Service des Espaces Naturels et Ruraux. DIREN, Basse-Terre.
- FARINET J.L., 2000. Traitement des vinasses de distillation de mélasse et jus de canne à sucre. Rapport de mission CIRAD CA/GEC, Montpellier, 4p.
- GODEFROY J., DORMOY M., 1988. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe « sol-bananeraie-climat ». Application à la programmation de la fumure. III-Cas des andosols. *Fruits*, 43, 263-267.
- GODEFROY J., DORMOY M., 1989. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe « sol-bananeraie-climat ». Application à la programmation de la fumure. IV-Cas des sols brun-rouille à halloysite. *Fruits*, 44, 3-12.
- GODEFROY J., MULLER M., ROOSE E., 1970. Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire. *Fruits*, 25, 403-422.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE, 1999. Agreste-DOM. Paris.
- NEY B., 1987. Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. I.-Analyse des influences du travail du sol et de l'irrigation sur le fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante dans les exploitations de Guadeloupe (F.W.I.). *Agronomie*, 7, 247-256.
- NG KEE KWONG K. F., DEVILLE J., 1984. Nitrogen leaching from soil cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indian ocean. *J. Environ. Qual.* 13, 471-474.
- NG KEE KWONG K. F., DEVILLE J., CAVALOT P. C., RIVIERE V., 1986. Biological immobilization of fertilizer nitrogen in humid tropical soils of Mauritius. *Soil Science*, 141, 195-199.
- RAUNET M., 1988. Carte morpho-pédologique de la Réunion. *In* SDAGE-Réunion, BRGM, Saint-Denis.)
- RUY S., 1997.- Les trois voies simultanées de l'infiltration dans un vertisol de la Guadeloupe. Etude expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat Univ. Montpellier II, 243 p.+annexes.
- SCATENA F. N., SILVER W. L., SICAMA T. G., JOHNSON A. H., SANCHEZ M. J., 1993. Biomass and nutrient content of the Bisley Experimental watersheds, Luquillo experimental forest, Puerto Rico, before and after hurricane Hugo, 1989. *Biotropica*, 25, 15-27.
- SICA-ASSOBAG, 1987. Spécial technique. Banane Information, 45, SICA-ASSOBAG, Basse-Terre (*devenue GIE Agroservice*).
- SIERRA J., 2000. Prise en compte de la distribution ammonium / nitrate dans les sols ferrallitiques acides. La Réunion STICS 2000, 21-22 septembre 2000, Montpellier. Note INRA-APC.

SIERRA J., MARBAN L., 2000. Nitrogen minéralization pattern of an oxisol of Guadeloupe, French West Indies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2002-2010.

SIERRA J., FONTAINE S., DESFONTAINES L., 2001. Factors controlling N mineralization, nitrification, and nitrogen losses in an Oxisol amended with sewage sludge. *Aust. J. Soil Res.*, 39, 519-534.

SILVER W. L., SCATENA F. N., JOHNSON A. H., SICAMA T. G., WATT F., 1996. At what temporal scales does disturbance affect belowground nutrient pools ? *Biotropica*, 28, 441-457.

Figure 1 : Les sols argileux variés et typés des Départements français d'Outre-Mer insulaires.
Exemple de la Guadeloupe

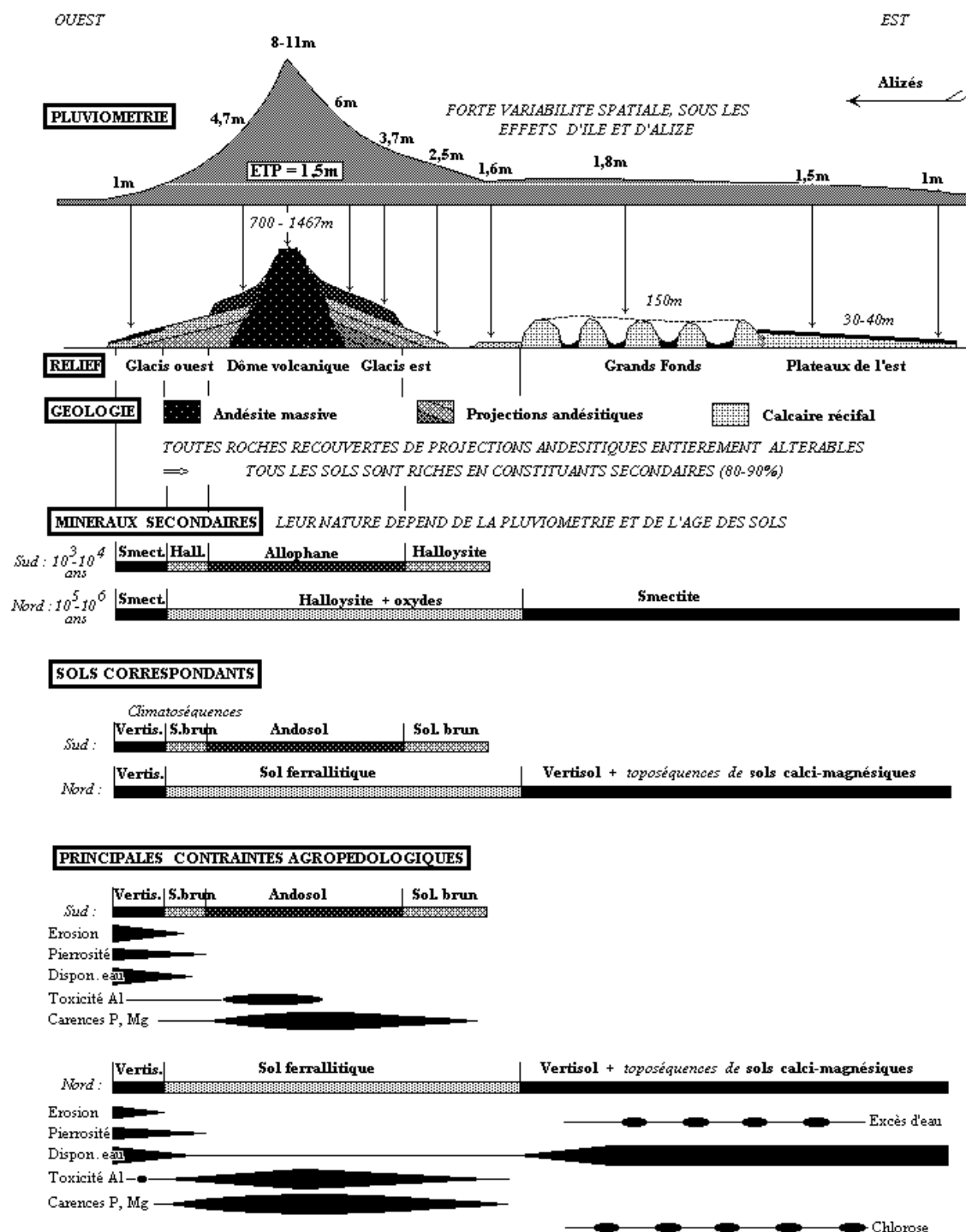


Figure 2 : Esquisse des flux d'eau et de polluants dans les sols de la Guadeloupe

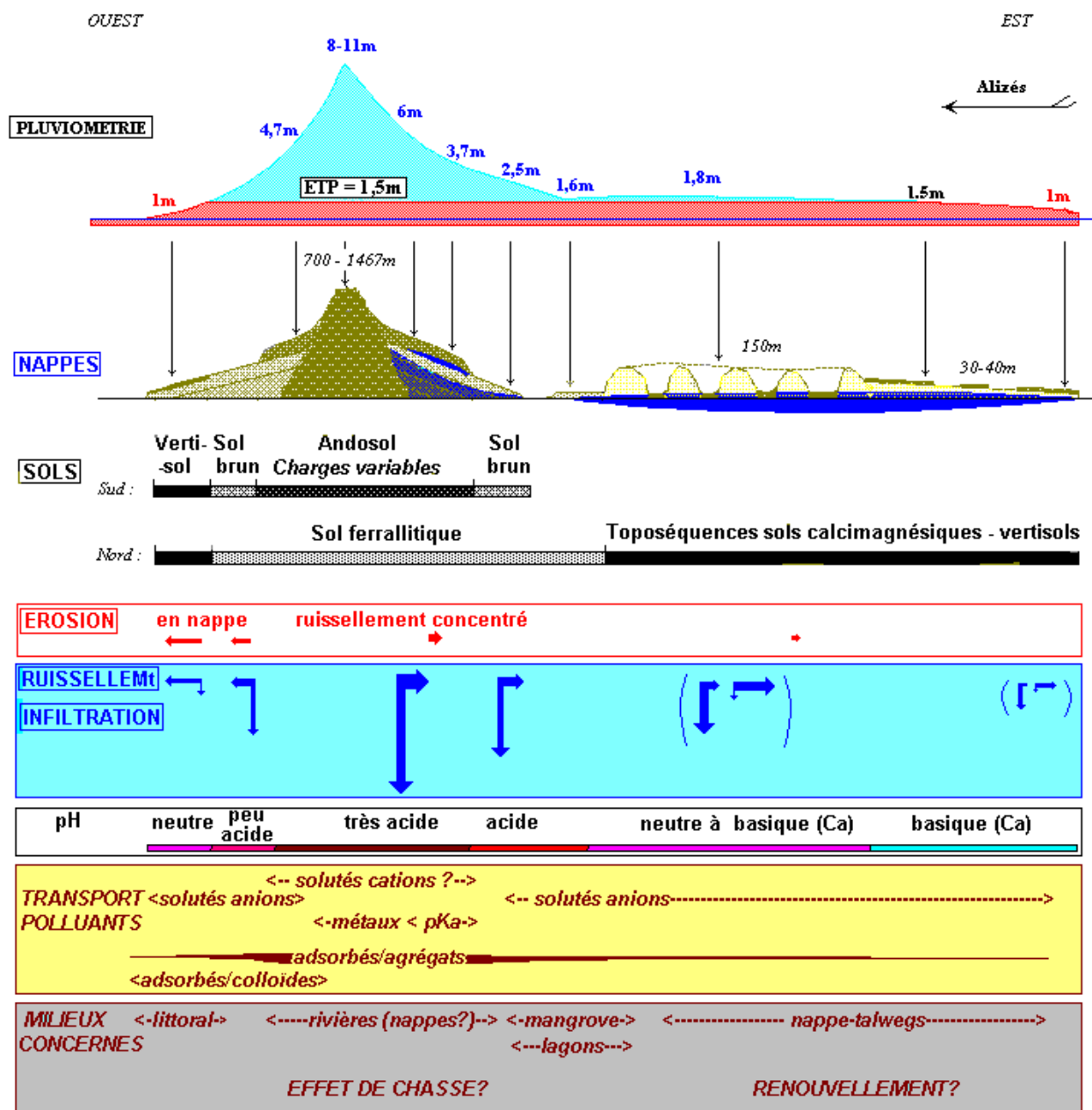


Figure 3 :

Concentration simulée en NO₃- des flux drainants en moyenne annuelle :
sols sur cendres, excès N = 200 kg/ha,
en 4 apports, prédilués dans RFU

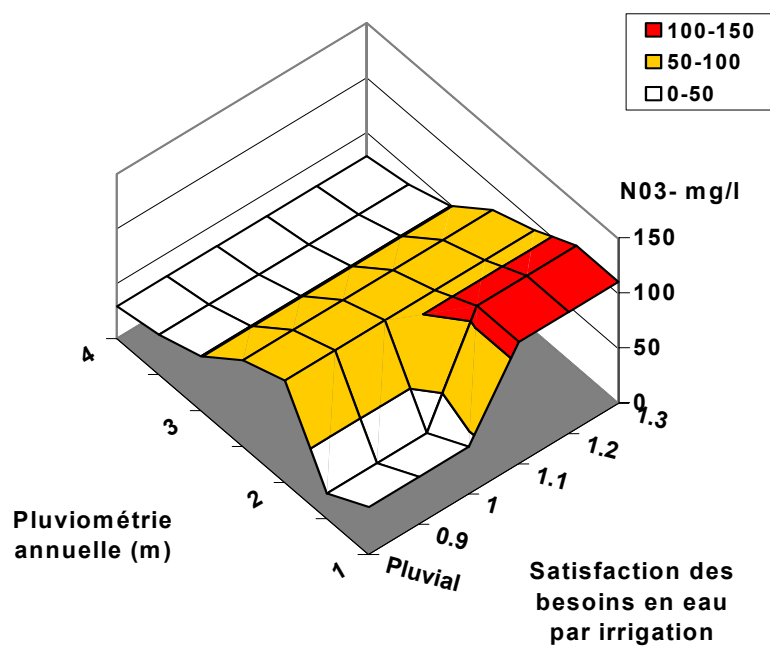


Figure 4 :

Concentration simulée en NO₃- des flux drainants en moyenne annuelle :
sols évolués, excès N = 200 kg/ha
en 4 apports, prédilués dans RFU

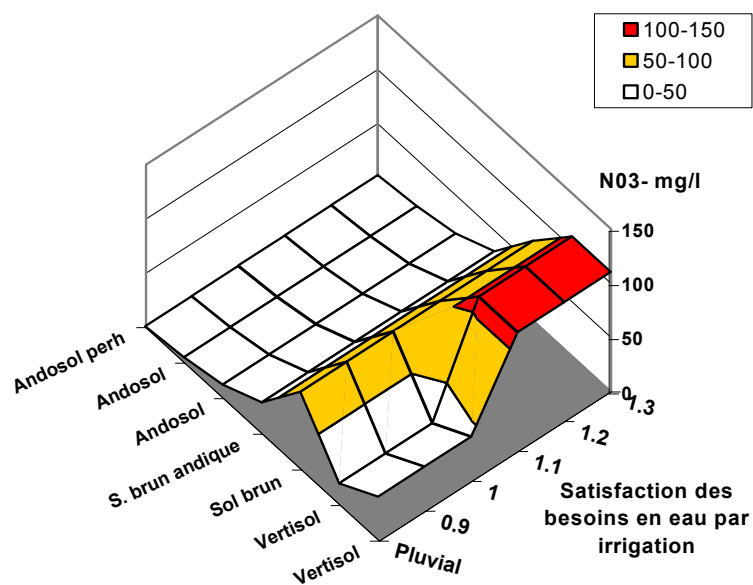


Figure 5 :

**Concentration simulée en NO₃-
des flux de drainage en saison sèche**
Sols évolués, excès N = 20 kg/ha

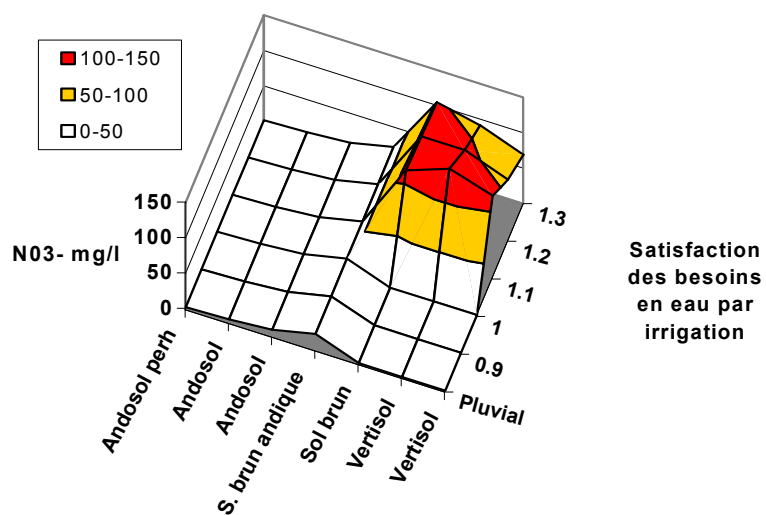


Figure 6 : Imbrication des sources de pollutions azotées d'origines urbaine, industrielle et agricole. Exemple de la Guadeloupe

